

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЦЕНТРАЦИЙ АЭРОЗОЛЯ И САЖИ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА В БАРЕНЦБУРГЕ (ШПИЦБЕРГЕН) В 2011–2013 гг.

канд. физ.-мат. наук Д.Г. ЧЕРНОВ¹, канд. физ.-мат. наук В.С. КОЗЛОВ¹,
д-р физ.-мат. наук М.В. ПАНЧЕНКО¹, программист Ю.С. ТУРЧИНОВИЧ¹,
канд. геогр. наук В.Ф. РАДИОНОВ², инж. 1-й кат. А.В. ГУБИН²,
науч. сотр. А.Н. ПРАХОВ²

¹ — ФГБУН Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Томск,
e-mail: chernov@iao.ru, vkozlov@iao.ru, tus@iao.ru, ptv@iao.ru

² — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.
Санкт-Петербург, e-mail: vradi@aari.ru, a-k-l@mail.ru, aleks.prahov@rambler.ru

ВВЕДЕНИЕ

Понимание важности данных о состоянии окружающей среды в Арктике и субарктических районах привело в течение двух последних десятилетий к значительному увеличению исследований (Jacobson, 2001; Bond et al., 2006, 2013; Kozlov et al., 2008; Смирнов и др., 2000; Иванов и др., 2009; Польшин и др., 2008; Сакерин и др., 2012; Виноградова, Веремейчик, 2013; Clarke, Noone, 1985; Quinn et al., 2008; Wang, Penner, 2008; Eleftheriadis et al., 2009; Engvall et al., 2009; Hirdman et al., 2010; Weinbruch et al., 2012; Stohl et al., 2012). Арктический регион в настоящее время рассматривается как наиболее важный индикатор глобальных климатических изменений, происходящих на планете. Наряду с парниковыми газами важную роль в изменении экологического состояния и радиационного баланса атмосферы играет атмосферный аэрозоль (частицы размерами 10–10000 нм). Аэрозольные частицы, загрязняющие атмосферу и подстилающую поверхность в Арктике и субарктических районах России, в основном переносятся из многочисленных антропогенных (тепловые станции, промышленность, транспорт, факелы дожигания попутных нефтяных газов и др.) и природных (лесные пожары, вулканы, песчаные бури и др.) источников в умеренных широтах (Bond et al., 2013; Kozlov et al., 2008; Виноградова, Веремейчик, 2013; Hirdman et al., 2010). Переносимые воздушными массами на тысячи километров от источников, аэрозольные частицы трансформируются, перемешиваются и создают среднерегиональные уровни аэрозольных концентраций.

В составе аэрозольных частиц часто присутствует сажевая компонента, генерируемая в ходе процессов неполного сгорания углеводородных топлив и биомассы (Jacobson, 2001; Bond et al., 2006; Kozlov et al., 2008; Eleftheriadis et al., 2009). Сажа, как основное поглощающее вещество в составе атмосферного аэрозоля, служит ключевым фактором его радиационно-климатического воздействия на атмосферу. По последним оценкам радиационный форсинг нагрева атмосферы за счет сажи со-

поставим с воздействием основного парникового газа CO_2 (Bond et al., 2013). В то же время, по заключению Межправительственной группы по изучению изменений климата (IPCC), при оценках радиационного воздействия различных составляющих атмосферы на климат наиболее низкий уровень знаний относится к роли аэрозоля и сажи в атмосфере. Это связано с недостатком информации о содержании, характеристиках пространственно-временной изменчивости и процессах трансформации слабопоглощающего субмикронного аэрозоля и сажи в арктической атмосфере. Аэрозоль оказывает многообразное влияние на радиационный баланс (Jacobson, 2001; Wang, Penner, 2008; Clarke, Noone, 1985). При прямом воздействии слабопоглощающий аэрозоль в основном рассеивает коротковолновую солнечную радиацию и тем самым выхолаживает атмосферу, в то время как сильнопоглощающая компонента в составе аэрозоля нагревает ее (Jacobson, 2001; Bond et al., 2006, 2013). Суммарное воздействие (радиационный форсинг) определяется соотношением масс сажи и непоглощающего вещества в составе аэрозольных частиц — так называемой величиной относительного содержания сажи в аэрозоле (Kozlov et al., 2008). Косвенный эффект аэрозоля и сажи проявляется во влиянии на процессы облакообразования и радиационные свойства облаков (Wang, Penner, 2008), а также в уменьшении альбедо подстилающей поверхности за счет осаднения на снежно-ледовый покров. Седиментация сажесодержащих частиц вызывает уменьшение альбедо, увеличение поглощения солнечного излучения, что приводит к более интенсивному таянию снега и льда.

Детальное изучение свойств и закономерностей изменчивости арктического аэрозоля возможно при непрерывном мониторинге состояния окружающей среды на сети стационарных станций для получения статистически обоснованных данных об уровне загрязнений. Комплексные исследования состояния окружающей среды, начатые в настоящее время, позволяют получить и прогностические оценки, необходимые для планирования мероприятий по предотвращению опасных экологических и климатических последствий в районах накопления или транзита антропогенных загрязняющих веществ. Одним из примеров является выполнение в рамках международного сотрудничества широкого комплекса атмосферных исследований, включая и измерения аэрозольной составляющей атмосферы, в Гидрометеорологической обсерватории Тикси, оснащенной современным научным оборудованием (Иванов и др., 2009). В Российском научном центре на Шпицбергене (РНЦШ) предполагается создание единой инфраструктуры систем мониторинга природных процессов и состояния окружающей среды в районе архипелага Шпицберген и на акватории Северного Ледовитого океана. Отметим, что длительные измерения характеристик атмосферного аэрозоля на Шпицбергене проводятся на норвежской научной станции Цеппелин (Ню-Олесунн, $78,9^\circ$ с.ш., $11,9^\circ$ в.д., 475 м над уровнем моря) (Tomasi et al., 2007; Quinn et al., 2008; Eleftheriadis et al., 2009; Hirdman et al., 2010; Weinbruch et al., 2012). Кроме Норвегии в Ню-Олесунне поддерживают свои исследовательские станции Нидерланды, Германия, Великобритания, Франция, Италия, Япония, Южная Корея и Китай. В южной части архипелага располагается польская станция Хорнсунд ($77,0^\circ$ с.ш., $15,5^\circ$ в.д., 10 м над уровнем моря), на которой проводятся регулярные солнечные фотометрические измерения спектральной прозрачности всей толщи атмосферы.

СОСТАВ АППАРАТУРЫ И МЕТОДИКА АЭРОЗОЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящей статье анализируются результаты измерений оптических и микрофизических характеристик приземного аэрозоля на метеорологическом полигоне РНЦШ, проведенных в весенний и летний сезоны 2011–2013 гг. Наблюдения выполня-

лись в районе Зональной гидрометеорологической обсерватории (ЗГМО) Баренцбург (78,1° с.ш., 14,2° в.д., 70 м над уровнем моря).

В режиме круглосуточного мониторинга в приземном слое воздуха измерялись следующие аэрозольные характеристики: счетная концентрация частиц N_A (см⁻³) в диапазоне диаметров более 0,3 мкм; распределение частиц по размерам dN/dr (см⁻³·мкм⁻¹), где r — радиус частиц, и массовая концентрация сажи M_{BC} (мкг/м³). Данные микро-структурных измерений использовались для вычисления распределения объема частиц (фактора аэрозольного заполнения) по размерам $dV/dr_i = 4/3 \cdot \pi r_i^3 dN_i$ (мкм²·см⁻³), где dN_i и r_i — счетные концентрации частиц и средние значения радиусов для i -го интервала размеров, и последующего расчета массовой концентрации аэрозоля M_A (мкг/м³) в предположении значения плотности аэрозольного вещества $\rho = 1,5$ г/см³.

Комплекс аппаратуры (мобильная аэрозольная станция) состоял из оптического счетчика частиц (Grimm, model 1.108 — в 2011 г., АЗ-10 — в 2012–2013 гг.) и четырехволнового двухканального аэталометра МДА, разработанного в Институте оптики атмосферы СО РАН (Козлов и др., 2008). Счетчики частиц использовались для измерений счетной концентрации N_A (см⁻³) и распределения частиц по размерам в диапазоне диаметров 0,3–20 мкм (Grimm) либо в диапазоне 0,3–5 мкм (АЗ-10). Периодическая калибровка счетчиков в процессе измерений осуществлялась с помощью внутренних калибраторов приборов.

Аэталометр МДА, аналогичный по принципу измерений использовавшемуся ранее в работе (Hansen, Rosen, Novakov, 1984), обеспечивал круглосуточную регистрацию массовой концентрации сажи M_{BC} (мкг·м⁻³) в атмосферном аэрозоле с концентрационной чувствительностью около 10 нг/м³ при прокачке через прибор 30 литров воздуха. Калибровка прибора выполнялась в лабораторных условиях с помощью пиролизного генератора сажевых частиц с размерами 50–200 нм путем сопоставления данных синхронных оптических и гравиметрических измерений (Baklanov et al., 1998). Дополнительно, с целью контроля стабильности калибровки используемого прибора, на Аэрозольной станции ИОА СО РАН в г. Томске ежегодно производятся интеркалибровочные измерения концентраций сажи в приземном аэрозоле с помощью аэталометров МДА и МААР 5012 (Petzold et al., 2005). В ходе экспедиционных измерений аэталометр дополнительно не калибровался, однако периодически производилась проверка «нуля» и герметичности воздушных магистралей прибора путем прокачки чистого воздуха через оптическую ячейку.

Аппаратура мобильной аэрозольной станции располагалась в помещении ЗГМО при комнатной температуре. В процессе измерений пробы воздуха отбирались на высоте 5 м от подстилающей поверхности и поступали по воздуховодам в измерительные ячейки оптического счетчика и аэталометра. При аспирации аэрозоля были обеспечены условия изокINETического забора проб воздуха. Для аэталометра внутренний диаметр и длина воздухопроводов составляли 1,5 см и не более 2 м соответственно, что обеспечивало измерения концентрации сажи без искажений в субмикронном диапазоне размеров (размеры частиц менее 1 мкм). Для оптического счетчика частиц длина воздушной магистрали составляла не более 1 м, что обеспечивало при скорости прокачки воздуха 1 л/мин изокINETичность забора аэрозольных частиц размерами до 20 мкм.

Измерения на аэрозольной станции выполнялись в автоматическом режиме круглосуточно с периодичностью 1 час под управлением компьютерной программы с возможностью изменения длительности и периодичности заборов проб воздуха.

Длительность разовых заборов в аэталометр составляла 20 минут при скорости прокачки воздуха 4 л/мин. Оптический счетчик частиц проводил измерения в течение 20,5 мин. Данные измерений заносились в реальном масштабе времени в рабочие файлы компьютера.

Важная роль при обработке и анализе полученных исходных данных отводилась предварительной выбраковке результатов наблюдений, отягощенных влиянием локальных источников аэрозоля в месте расположения пункта измерений, а также влиянием неблагоприятных метеорологических условий: низкая облачность, туманы, осадки и пр. Такие данные исключались из дальнейшей обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ АЭРОЗОЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА

На рис. 1. приведены временные зависимости массовой концентрации сажи M_{BC} , счетной N_A и массовой концентраций аэрозоля M_A для весеннего и летнего сезонов 2013 г.

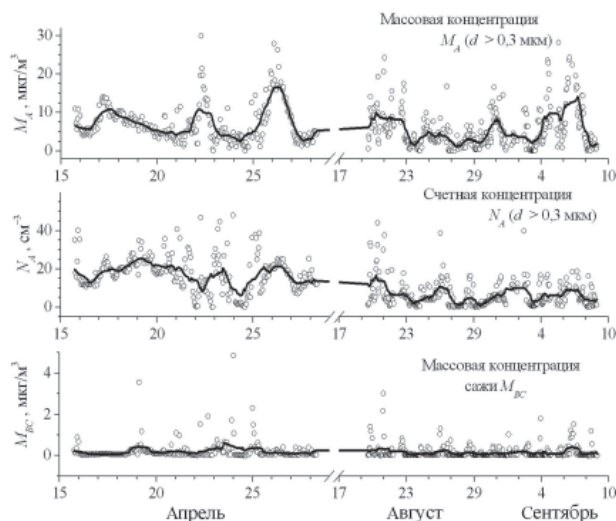


Рис. 1. Изменчивость счетной и массовой концентраций аэрозоля, массовой концентрации сажи в апреле и августе–сентябре 2013 г. в п. Баренцбург (Шпицберген).

Временной ход средних за час величин M_{BC} , N_A и M_A иллюстрирует согласованную изменчивость концентраций при изменении синоптических условий. На рисунках жирными линиями нанесены сглаженные за 24 часа исходные данные, которые характеризуют межсуточную изменчивость концентраций аэрозоля и сажи.

В табл. 1 приведены оценки средних значений аэрозольных характеристик и количество почасовых наблюдений для всех массивов данных, полученных в каждый из сезонов в 2011–2013 гг., а также средних за два сезона значений для каждого года измерений. На рис. 2 представлены средние величины M_{BC} , N_A и M_A .

Из приведенных в табл. 1 и на рис. 2 данных видно, что при переходе от весны к лету в приземном слое наблюдалось уменьшение средней за сезон счетной концентраций аэрозоля. Оно сопровождалось уменьшением соответствующих значений массовой концентрации в 2011 и 2013 гг., что соответствует обычному ходу сезонной изменчивости содержания аэрозоля в арктической атмосфере. Но в 2012 г. на фоне уменьшения счетной концентрации частиц наблюдался рост их массовой концентра-

Таблица 1

Средние значения ($\pm$ СКО) массовой M_A и счетной N_A ($>0,3$ мкм) концентраций аэрозоля и массовой концентрации сажи M_{BC} в 2011–2013 гг.

Период		$M_A \pm \text{СКО}, \text{ мкг/м}^3/N$	$N_A \pm \text{СКО}, \text{ см}^3/N$	$M_{BC} \pm \text{СКО}, \text{ мкг/м}^3/N$
2011	весна (19.04 – 26.05)	$0,92 \pm 1,03/741$	$4,95 \pm 3,49/744$	$0,15 \pm 0,09/731$
	лето (26.07 – 31.08)	$0,76 \pm 1,27/753$	$3,66 \pm 3,13/729$	$0,43 \pm 0,42/363$
	среднее	$0,84 \pm 1,15/1494$	$4,31 \pm 3,3/1473$	$0,29 \pm 0,25/1094$
2012	весна (20.04 – 12.06)	$1,41 \pm 1,35/912$	$12,0 \pm 13,76/912$	$0,10 \pm 0,13/1153$
	лето (21.07 – 28.08)	$1,93 \pm 2,59/268$	$4,05 \pm 6,45/268$	$0,15 \pm 0,25/804$
	среднее	$1,53 \pm 2,05/1180$	$10,2 \pm 11,5/1180$	$0,12 \pm 0,19/1957$
2013	весна (14.04 – 29.04)	$6,95 \pm 4,47/290$	$17,1 \pm 8,6/290$	$0,17 \pm 0,27/300$
	лето (18.08 – 10.09)	$5,31 \pm 5,05/381$	$6,06 \pm 6,59/381$	$0,15 \pm 0,3/422$
	среднее	$6,10 \pm 5,10/672$	$10,9 \pm 9,50/672$	$0,17 \pm 0,36/725$
Среднее за 2011–2013 гг.		$2,14 \pm 2,26/3346$	$7,73 \pm 7,46/3325$	$0,18 \pm 0,24/3776$

Примечание. N — количество почасовых измерений.

ции. Такое увеличение массовой концентрации аэрозольных частиц при уменьшении их счетной концентрации может быть связано с существенным отличием дисперсного состава аэрозоля весной при наличии снежного покрова и летом при его отсутствии и дополнительном поступлении почвенной пыли в приземный слой воздуха в этот год.

Анализ экспериментальных данных показал, что по средним значениям характеристик состояние атмосферы в районе наблюдений в целом характеризуется сравнительно низким уровнем аэрозольного замутнения приземного слоя воздуха. Так, «среднегодовые» значения массовой и счетной концентраций аэрозоля изменялись в диапазонах $M_A = 0,84 \div 6,1$ мкг/м³ и $N_A = 4,3 \div 10,9$ см⁻³, а массовая концентрация сажи $M_{BC} = 0,12 \div 0,29$ мкг/м³. Пониженный уровень содержания аэрозоля в приземном слое согласуется с данными о высокой прозрачности всей толщи атмосферы, полученными по данным солнечно-фотометрических измерений (Сакерин и др., 2012). «Среднегодовые» значения аэрозольной оптической толщины атмосферы на длине волны 0,5 мкм в 2011 г. варьировали в пределах $0,045 \div 0,068$ — для субмикронных частиц и $0,020 \div 0,033$ — для частиц крупнодисперсного (более 1 мкм) диапазона размеров, что характеризует очень низкий уровень аэрозольного замутнения атмосферы.

Но, даже при низких уровнях аэрозольного замутнения приземного слоя воздуха, массовая и счетная концентрации аэрозоля испытывали значительные межгодовые

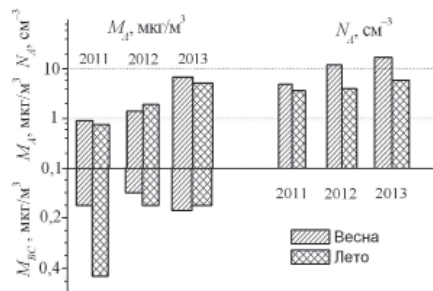


Рис. 2. Среднесезонные весенние и летние значения массовой и счетной концентраций аэрозоля, массовой концентрации сажи в 2011–2013 гг. в районе п. Баренцбург.

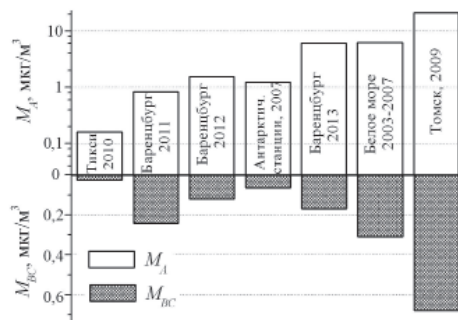


Рис. 3. Средние значения массовой концентрации аэрозоля M_A и сажи M_{BC} в Баренцбурге, в высокоширотных районах Арктики, Антарктики и в Томске.

вариации: M_A в разные годы отличались более чем в 7 раз, а счетные концентрации N_A — в 2,5 раза. Их минимальные значения наблюдались в 2011 г. Но в 2011 г. наблюдалась максимальная «среднегодовая» массовая концентрация сажи $M_{BC} \sim 0,29$ мкг/м³, в основном обусловленная повышенным содержанием сажи летом.

В 2012 г. в летний период также наблюдались более высокие массовые концентрации сажи по сравнению с весенними значениями. Только в 2013 г. происходило уменьшение концентрации сажи от весны к лету, согласованное с убыванием счетной концентрации аэрозольных частиц. Эти отличия внутригодового хода содержания сажевого аэрозоля в приземном воздухе в разные годы могут быть связаны с влиянием местного источника — каменноугольных шахт и транспортируемого из них угля.

На рис. 3 представлены средние массовые концентрации аэрозоля и сажи в районе п. Баренцбург в 2011–2013 гг. в сопоставлении с данными для высокоширотных районов (Полькин и др., 2008; Сакерин и др., 2012) и в Томске (Козлов и др., 2012).

Как видно, в рассмотренных районах минимальные средние концентрации аэрозоля и сажи наблюдались в п. Тикси (71,7° с.ш., 125,9° в.д.) — $M_A = 0,16$ мкг/м³ и $M_{BC} = 0,026$ мкг/м³, а максимальные — $M_A = 21,2$ мкг/м³ и $M_{BC} = 0,68$ мкг/м³ в Томске (56,5° с.ш., 85,1° в.д.). Сравнительный анализ полученных данных показал, что средние массовые концентрации аэрозоля и сажи в Баренцбурге занимают промежуточное положение между данными в Тикси и более высокими значениями концентраций в районе Белого моря. В Баренцбурге средние значения M_A в 2011 г. — в 1,5 раза меньше, а в 2012–2013 гг. — в 1,2–4,9 раз больше значений, наблюдаемых на антарктических станциях. Отметим, что концентрации сажи в пункте наблюдений на Шпицбергене устойчиво превышают ее содержание в полярных областях ($M_{BC} = 0,065$ мкг/м³ в Антарктике) от 1,8 раз в 2012 г. до 3,7 раз в 2011 г. При этом соответствующие наибольшие средние концентрации обеих аэрозольных характеристик в Баренцбурге (в 2013 г. по аэрозолю и в 2011 г. по саже) сопоставимы с концентрациями над Белым морем. Из отмеченного следует, что состав арктического аэрозоля в районе Баренцбурга существенно варьирует и подвержен как воздействию процессов дальнего переноса загрязнений с континента, так и влиянию неучтенных локальных источников и факторов накопления аэрозоля. Так, повышенный уровень концентрации сажи от 200 до 400 нг/м³, выявленный во время научно-исследовательского круиза судна в Белом, Баренцевом и Карском морях (Stohl et al., 2013), авторы связывают с сильными эмиссиями сажевого аэрозоля в субарктических районах при сжигании в факелах попутных нефтяных газов и последующим переносом сажи в Арктику.

Ранее регулярные аэталометрические измерения массовой концентрации сажи на Шпицбергене проводились только на норвежской научной станции Цеппелин, находящейся примерно в 100 км севернее п. Баренцбург. По результатам мониторинговых аэталометрических измерений сажи в 1998–2007 гг. авторами работы (Eleftheriadis et al., 2009) было получено, что среднемесячные концентрации сажи в течение года уменьшаются от максимальных значений ~ 80 нг/м³ в феврале–марте до минимальных ~ 0 –10 нг/м³ в июне–сентябре. Отметим, что в континентальных условиях сезонная динамика концентрации сажи также характеризуется зимним максимумом и летним минимумом значений.

Полученные нами в весенне-летние периоды 2011–2013 гг. средние значения концентраций сажи в Баренцбурге значительно превышают значения, наблюдаемые на станции Цеппелин, особенно в летний период. Наиболее вероятной причиной таких различий является то, что условия измерений на двух станциях существенно отличаются. Можно отметить две наиболее важные, по нашему мнению, причины различий. Во-первых, станция Цеппелин находится за пределами населенного пункта и, следовательно, в значительно меньшей степени подвержена влиянию локальных местных источников аэрозоля. Напротив, станция в п. Баренцбург, расположенная на окраине населенного пункта, подвержена воздействию различных локальных источников аэрозоля (рассеяние дыма ТЭЦ в приземном слое, возможные транспортные эмиссии, ветровые выносы почвенной и каменноугольной пыли в летний период).

Во-вторых, станция Цеппелин расположена на вершине горы. По этой причине в сезонной и межгодовой динамике аэрозольных характеристик здесь вполне могут проявляться особенности высотного распределения концентраций аэрозоля и сажи в атмосфере, связанные со стратификацией тропосферы, обуславливающей уменьшение концентраций аэрозоля и сажи с увеличением высоты, часто наблюдаемое в континентальных условиях (Козлов и др., 2009).

ИЗМЕНЧИВОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ

На рис. 4 приведены средние объемные распределения частиц по размерам в районе Баренцбурга в 2011–2013 гг., осредненные за весенние и летние периоды наблюдений. В сезонной динамике распределений частиц по размерам за трехлетний период измерений можно отметить следующие основные особенности. В каждый из

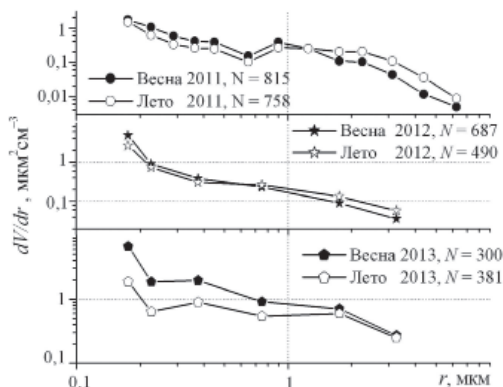


Рис. 4. Средние объемные распределения частиц по размерам в районе Баренцбурга в весенние и летние периоды наблюдений в 2011–2013 гг.

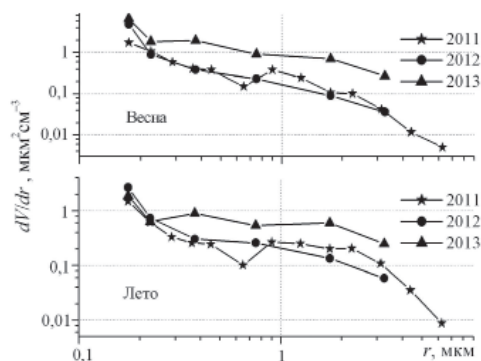


Рис. 5. Средние за весенний и летний сезоны распределения частиц по размерам в районе Баренцбурга в разные годы.

трех годов наблюдений при переходе от весны к лету в распределениях происходило уменьшение концентраций мелкодисперсных частиц, а в 2011 и 2012 гг. увеличивалось и содержание крупнодисперсных частиц.

Общей особенностью было сезонное уменьшение счетных концентраций обеих фракций, приводящее к значительному уменьшению селективности распределения частиц. Наибольшее (до 3,5 раз) уменьшение концентраций наблюдалось в субмикронной области размеров частиц. При этом концентрация крупнодисперсных частиц уменьшалась не столь значительно (до 2,5 раз), оставаясь неизменной для наиболее крупных частиц с радиусами больше 2 мкм. Отметим, что полученная тенденция сезонного уменьшения селективности (наклона кривой распределений частиц по размерам) свидетельствует о росте доли крупных частиц в составе аэрозоля в летний период, что качественно согласуется с нашим предположением об увеличении летом долевого вклада пылевой компоненты аэрозоля в величину аэрозольного поглощения (концентрации сажи).

На рис. 5 приведены те же, что и на рис. 4, значения, но объединенные по сезонам наблюдений в каждый из годов. Видно, что особенности межгодовой изменчивости распределений частиц по размерам для весеннего и летнего сезонов в 2011 и 2012 гг. близки между собой.

Однако в 2013 г. динамика спектра объемных концентраций частиц существенно изменилась. В 2013 г., по сравнению с предшествующими годами, произошел зна-

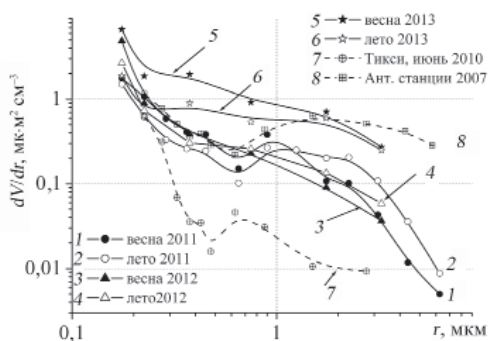


Рис. 6. Сравнение средних за сезоны наблюдений объемных распределений частиц по размерам в районе архипелага Шпицберген (п. Баренцбург) в 2011–2013 гг. с данными измерений (Сакерин и др., 2012) в высокоширотных районах Арктики и в Антарктике.

чительный рост объемных концентраций по всему спектру размеров. Увеличение концентраций достигало 5 раз для субмикронных и до 8 раз для крупнодисперсных частиц. Подобная динамика привела к значительному уменьшению селективности распределения частиц по размерам.

На рис. 6 сравниваются средние за сезоны распределения частиц по размерам, полученные весной и летом 2011–2013 гг., с результатами ранее выполненных измерений в Арктике (п. Тикси, июнь 2010 г.) и в Антарктике (Сакерин и др., 2012).

Как видно, результаты сезонных измерений на Шпицбергене (п. Баренцбург) в 2011 и 2012 гг. расположены между кривыми распределений частиц по размерам, полученными ранее для высокоширотных измерений в п. Тикси (кривая 7) и в Антарктике (кривая 8). Однако весной и летом 2013 г. наблюдалось значительное (в 3–4 раза) превышение концентраций частиц субмикронных размеров в п. Баренцбург по сравнению с данными в Антарктике. При этом в области диаметров частиц более 2 мкм объемные концентрации в Баренцбурге сопоставимы с наблюдавшимися в Тикси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Натурные исследования аэрозольных характеристик приземного слоя атмосферы на архипелаге Шпицберген (п. Баренцбург) в весенний и летний сезоны 2011–2013 гг. показали, что аэрозоль в районе измерений характеризовался сравнительно невысокими величинами средних значений счетной и массовой концентраций аэрозоля и сажи и небольшим диапазоном их изменчивости: $M_A = 0,84 \div 6,1$ мкг/м³; $N_A = 4,3 \div 10,9$ см⁻³; $M_{BC} = 0,12 \div 0,29$ мкг/м³. При этом средние величины массовой и счетной концентрации аэрозоля значительно изменялись от года к году. Минимальные средние значения массовой и счетной концентраций аэрозоля наблюдались в 2011 г. ($M_A = 0,84 \pm 1,15$ мкг/м³, $N_A = 4,3 \pm 3,3$ см⁻³). В 2013 г. средние значения этих концентраций были максимальны и составили $M_A = 6,1 \pm 5,1$ мкг/м³, $N_A = 10,9 \pm 9,5$ см⁻³.

Межгодовые изменения массовой концентрации сажи не повторяли изменения параметров аэрозольных частиц. В 2011 г. наблюдалось наибольшее за 3 года значение средней массовой концентрации сажи ($M_{BC} = 0,29$ мкг/м³), но в 2012 г. наблюдалось значительное ее уменьшение — до $M_{BC} = 0,12$ мкг/м³. В 2013 г. величина M_{BC} выросла в 1,4 раза по сравнению со значением в 2012 г. — до $M_{BC} = 0,17$ мкг/м³.

Обычной особенностью сезонной изменчивости содержания аэрозоля в атмосфере Арктики при переходе от весны к лету является уменьшение концентраций аэрозоля и сажи. В Баренцбурге это наиболее отчетливо проявилось в 2012 г. в изменении счетной концентраций аэрозоля — уменьшение от весны к лету составило 2,8 раза. Однако в этом же году наблюдался рост массовой концентрации аэрозоля от весны к лету. В 2011–2012 гг. наблюдался и рост массовой концентрации сажи, особенно сильно проявившийся летом 2012 г. (увеличение в 3 раза по сравнению с весенними значениями). Наиболее вероятной причиной этому является ветровое поступление почвенной и каменноугольной пыли в приземный слой воздуха в летний сезон, дающей вклад в аэрозольное поглощение. Такой вывод согласуется с полученными результатами анализа сезонной динамики объемных распределений частиц по размерам, показавшими, что в летний период уменьшалась селективность функции распределения частиц, свидетельствующая о возрастающем долевым вкладе крупнодисперсных (пылевых) частиц в дисперсный состав аэрозоля.

Сопоставление результатов аэрозольных измерений в п. Баренцбург в 2011–2013 гг. с литературными данными по составу атмосферы на Шпицбергене

и в других высокоширотных районах Арктики и в Антарктике позволило оценить пределы вариаций аэрозольных характеристик в этом пункте. Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии локальных источников аэрозоля, включая и сажевый, на уровни загрязнения приземного слоя воздуха в Баренцбурге. Начатый в настоящее время мониторинг аэрозольных характеристик в перспективе позволит оценить изменчивость аэрозольного загрязнения воздуха в районе РНЦШ для различных временных масштабов (сутки, месяц, сезон, год) и при накоплении достаточного объема данных разработать эмпирические оптические и микрофизические модели аэрозоля в регионе размещения станции (см., например, Ranchevko et al., 2012). Они необходимы, в частности, для радиационных блоков при модельных оценках климатических изменений в регионе, а также контроля экологического состояния природной среды.

Авторы выражают благодарность организаторам и руководству экспедициями «Шпицберген-2011, 2012 и 2013» Л.М. Саватюгину и И.Ю. Соловьяновой за помощь в проведении исследований. Работа выполнялась при частичной поддержке проекта № 23 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН; гранта РФФИ № 14-05-93109 НЦНИЛ_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградова А.А., Веремейчик А.О. Модельные оценки содержания антропогенной сажи в атмосфере Российской Арктики // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 6. С. 443–451.
- Иванов Н.Е., Махитас А.П., Шутилин С.В., Гунн Р.М. Многолетняя изменчивость характеристик климата района гидрометеорологической обсерватории Тикси // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 24–41.
- Козлов В.С., Панченко М.В., Польшин В.В., Шмаргунов В.П., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Голобокова Л.П., Нецветаева О.Г., Онищук Н.А., Оболкин В.А., Потемкин В.Л. Микрофизические характеристики приземного аэрозоля, химический состав воздуха и осадков в Сибири и Приморье // Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / Под ред. С.М. Сакерина. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2012. С. 255–342.
- Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Панченко М.В. Сезонная изменчивость вертикальных профилей поглощающих характеристик субмикронного аэрозоля в тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 7. С. 635–642.
- Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Польшин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 155–157.
- Польшин В.В., Панченко М.В., Грищенко И.В., Коробов В.Б., Лисицын А.П., Шевченко В.П. Исследования дисперсного состава приземного аэрозоля Белого моря в конце летнего сезона 2007 г. // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 10. С. 836–840.
- Сакерин С.М., Чернов Д.Г., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Панченко М.В., Польшин В.В., Радионов В.Ф. Предварительные результаты исследований аэрозольных характеристик атмосферы в районе Баренцбурга (Шпицберген) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 1 (91). С. 20–31.
- Смирнов В.В., Пронин А.А., Радионов В.Ф., Савченко А.В., Шевченко В.П. Внутрисезонные факторы изменчивости аэрозольного и ионного состава полярных атмосфер // Известия АН. ФАО. 2000. Т. 36. № 5. С. 639–649.
- Baklanov A.M., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Ankilov A.N., Vlasenko A.L. Generation of soot particles in submicron range // J. Aerosol Sci. 1998. Vol. 29. Suppl. 1. P. 919–920.
- Bond T.C., Bergstrom R.W. Light absorption by carbonaceous particles: an investigative review // Aer. Sci. and Technol. 2006. Vol. 40 (1). P. 27–67.

- Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M. et al.* Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // *Journal of Geophysical Research – Atmosphere*. 2013. Vol. 118. P. 5380–5552. doi:10.1002/jgrd.50171.
- Clarke A.D., Noone K.J.* Soot in the Arctic snowpack: a cause for perturbations in radiative transfer // *Atmos. Environ.* 1985. Vol. 19. P. 2045–2053.
- Eleftheriadis K., Vratolis S., Nyeki S.* Aerosol black carbon in the European Arctic: measurements at Zeppelin station, Ny-Ålesund, Svalbard from 1998–2007 // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36. L02809. doi:10.1029/2008GL035741.
- Engvall A.-C., Ström J., Tunved P., Krejci R., Schlager H., Minikin A.* The radiative effect of an aged, internally mixed Arctic aerosol originating from lower-latitude biomass burning // *Tellus B - Chemical and Physical Meteorology*. 2009. Vol. 61(4). P. 677–684. doi: 10.1111/j.1600-0889.2009.00432.x.
- Hansen A.D.A., Rosen H., Novakov T.* The Aethalometer—An Instrument for The Real-time Measurement of Optical Absorption by Aerosol Particles // *Sci. Total. Envir.* 1984. Vol. 36. P. 191–196.
- Hirdman D., Burkhart J.F., Sodemann H., Eckhardt S., Jefferson A., Quinn P.K., Sharma S., Ström J., Stoh A.* Long-term trends of black carbon and sulphate aerosol in the Arctic: changes in atmospheric transport and source region emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. Vol. 10 (19). P. 9351–9368.
- Jacobson M.Z.* Strong radiative heating due to the mixing slate of black carbon in atmospheric aerosols / *Nature*. 2001. Vol. 409. P. 695–697.
- Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P.* Mass fraction of Black Carbon in submicron aerosol as an indicator of influence of smokes from remote forest fires in Siberia // *Atmospheric Environment*. 2008. Vol. 42 (11). P. 2611–2620.
- Panchenko M.V., Zhuravleva T.B., Terpugova S.A., Polkin V.V., Kozlov V.S.* An empirical model of optical and radiative characteristics of the tropospheric aerosol over West Siberia in summer // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. Vol. 5 (7). P. 1513–1527.
- Petzold A., Schloesser H., Sheridan P.J., Arnott W.P., Ogren J.A., Virkkula A.* Evaluation of Multiangle Absorption Photometry for Measuring Aerosol Light Absorption // *Aerosol Sci. and Technol.* 2005. Vol. 39. № 1. P. 40–51. doi:10.1080/027868290901945.
- Quinn P.K., Bates T.S., Baum E., Doubleday N., Fiore A., Flanner M., Fridlind A., Garrett T., Koch D., Menon S., Shindell D., Stohl A., Warren S.G.* Short-lived pollutants in the Arctic: Their climate impact and possible mitigation strategies // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008. Vol. 8. P. 1723–1735.
- Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S., Kupiainen K., Shevchenko V., Kopeikin V., Novigatsky A.* Black carbon in the Arctic: the underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. Vol.13. P. 8833–8855.
- Tomasi C., Vitale V., Lupi A., Di Carmine C. et al.* Aerosols in polar regions: A historical overview based on optical depth and in situ observations // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. D16205 doi: 10.1029/2007JD008432.
- Wang M., Penner J.E.* Aerosol indirect forcing in a global model with particle nucleation // *Atmos. Chem. Phys. Disc.* 2008. Vol. 8. P. 13943–13998. SRef-ID: 1680-7375/acpd/2008-8-13943.
- Weinbruch S., Wiesemann D., Ebert M., Schütze K., Kallenborn R., Ström J.* Chemical composition and sources of aerosol particles at Zeppelin Mountain (Ny-Ålesund, Svalbard): An electron microscopy study // *Atmos. Environ.* 2012. Vol. 49. P. 142–150.